

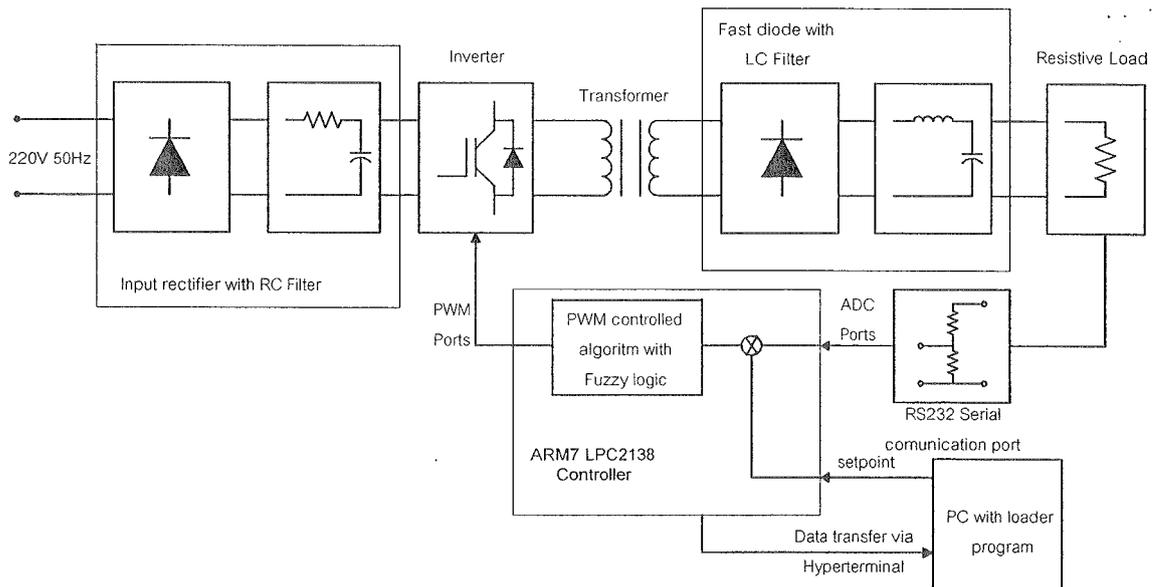
บทที่ 3

การออกแบบแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิง

3.1 โครงสร้างหลักของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิง

การออกแบบระบบจ่ายไฟแบบสวิตซิง ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบ แหล่งจ่ายไฟสวิตซิงแบบฟลูบริดจ์ ขนาด 500 วัตต์ 48 โวลต์ ที่ใช้ระดับแรงดันอินพุตขนาด 220 โวลต์ ± 5 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ การควบคุมระบบจะใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 LPC2138 ของบริษัท Phillips เป็นตัวประมวลผลและใช้โปรแกรมพีซีในการควบคุมแรงดันด้านเอาต์พุต

หลักการออกแบบ แหล่งจ่ายไฟสวิตซิง นี้จะสามารถแบ่งแยกออกเป็นทั้งหมด 6 ส่วน หลักๆ ซึ่งประกอบกันเข้าเป็น แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบทางวิศวกรรม การเลือกใช้งานอุปกรณ์ต่าง สาเหตุในการเลือกใช้งาน จะอธิบายตามลำดับต่อไปนี้



ภาพประกอบที่ 3.1 โครงสร้างการทำงานของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิง

1. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่ใช้อินพุต เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 โวลต์ พร้อมอุปกรณ์ปกป้องต่างๆ
2. อินเวอร์เตอร์ใช้งานโดยการสวิตช์ที่ระดับความถี่ 60 kHz แบบฟลูบริดจ์สัญญาณสี่เหลี่ยม
3. หม้อแปลงความถี่สูงใช้แกนเฟอร์ไรต์ เป็นตัวส่งผ่านกำลังไฟฟ้า ทั้งนี้หม้อแปลงแบบนี้จะเหมาะสมกับการสวิตช์ที่ความถี่สูง
4. วงจรเรียงกระแสด้านท้ายที่ประกอบด้วย Fast Recovery Diode

5. วงจรกรองค้ำท้ายแบบ RLC ใช้งานในการกรองแรงค้ำค้ำท้าย ให้เหลือแค่แรงค้ำ
กระแสตรง

6. ใช้ตัวประมวลสัญญาณ ARM7 LPC2138 และใช้โปรแกรมพีซีซีในการควบคุมการ
ป้อนกลับของแรงค้ำค้ำด้านเอาต์พุตประมวลสัญญาณเชิงดิจิตอล ที่เป็นตัวควบคุมระบบ

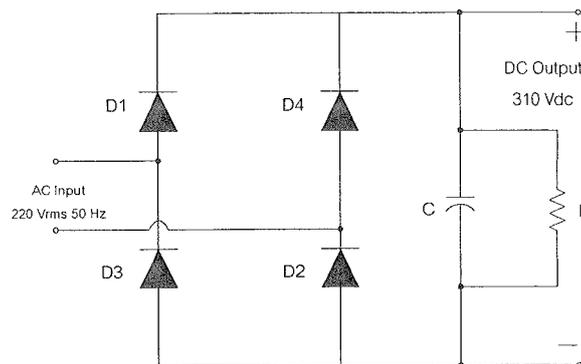
3.2 ลำดับและขั้นตอนการออกแบบ

ขั้นตอนในการออกแบบอย่างทีกล่าวข้างค้ำค้ำนี้ นั้น จะสามารถแยกการค้ำค้ำออกมาเป็นชุด
หลักๆ ได้ค้ำค้ำนี้

1. การออกแบบวงจรเรียงกระแสค้ำค้ำอินพุต
2. การออกแบบระบบขับสัญญาณมอสเฟต
3. การเลือกใช้งานมอสเฟต และ ชุดขับสัญญาณทีเหมาะสม
4. การออกแบบ หม้อแปลงความถี่สูง
5. การออกแบบวงจรเรียงกระแสค้ำค้ำเอาต์พุต
6. การออกแบบวงจรกรอง RLC
7. การควบคุมระบบโดยตัวประมวลผลและเขียนโปรแกรมพีซีซี ควบคุมการป้อนกลับของ
แรงค้ำค้ำ

3.3 การออกแบบวงจรเรียงกระแสค้ำค้ำเข้า

การออกแบบแหล่งจ่ายหลักให้ค้ำค้ำกับชุดอินเวอร์เตอร์นั้น มีความสำคัญมากกับแหล่งจ่ายไฟ
สวิตชิง เนื่องจากถ้าการออกแบบทีไม่เหมาะสมนั้นจะทำให้ แหล่งจ่ายไฟสวิตชิง ทำงานผิดพลาดค้ำค้ำ
ระบบ รวมถึงการเลือกใช้อุปกรณ์ทีเหมาะสมเช่นกัน อย่างเช่น ตัวเก็บประจุทีใช้งานต้องม้ค่ามากพอหรือม้
ค่า ESR ทีน้อยขึ้นอยู่ค้ำค้ำกับความเหมาะสมของ แต่ละระบบ อย่างทีกล่าวข้างค้ำค้ำ



ภาพประกอบที 3.2 วงจรเรียงกระแสค้ำค้ำเข้า

กำหนดให้แรงดันอินพุต เท่ากับ 220 โวลต์ \pm 10 เปอร์เซ็นต์ 50 Hz เอาต์พุตสูงสุดที่กำหนดไว้คือขนาด 500 วัตต์ ให้ประสิทธิภาพของระบบเป็นขนาด 80 เปอร์เซ็นต์ เราจะสามารถหา กำลังไฟฟ้าอินพุต ได้ดังสมการ(3.1)

$$\begin{aligned}
 P_m &= \frac{P_{out}}{\eta} & (3.1) \\
 &= \frac{500}{0.8} \\
 &= 625 \quad \text{วัตต์}
 \end{aligned}$$

จากแรงดันที่ไฟฟ้ากระแสสลับไหลเข้า 220 โวลต์ นั้นจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ปลายทางที่มีขนาด 310 โวลต์ กระแสไฟกระแสตรงเฉลี่ยจะ ได้ดังสมการ(3.2)

$$\begin{aligned}
 I_{dc} &= \frac{P_m}{V_m} & (3.2) \\
 &= \frac{625}{310} \\
 &= 2.01 \quad \text{แอมป์}
 \end{aligned}$$

จากการคำนวณข้างต้นนั้นเราสามารถที่จะคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุที่ใช้กรองแรงดันด้านเอาต์พุตให้เรียบได้จากสมการด้านล่าง เมื่อกำหนดให้ ripple มีขนาด 10 เปอร์เซ็นต์ หรือเปรียบเทียบจะได้แรงดันขนาด 310 โวลต์ ที่ความถี่ 50 Hz แบบฟลูบริดจ์จะมีความเท่ากับ 10 ms

$$\begin{aligned}
 C_t &= \frac{I_{dc} \Delta t}{\Delta V_{r(P-P)}} & (3.3) \\
 &= \frac{I_{dc} \cdot T / 2}{0.1 \cdot V_m} \\
 &= \frac{2.01 \times 20 \times 10^{-3} / 2}{0.1 \times 310} \\
 &= 6.484 \times 10^{-4} = 648.4 \quad \mu F
 \end{aligned}$$

ผลของการเลือกค่าตัวเก็บประจุที่ได้จากการคำนวณจะทำให้เราทราบถึงขนาดของตัวเก็บประจุที่แท้จริง แต่การเลือกตัวเก็บประจุนั้นจะต้องเน้นที่ตัวเก็บประจุที่มีขนาดมากกว่าที่เราคำนวณได้ ในกรณีนี้ ตัวเก็บประจุที่เราคำนวณได้ มีค่าเท่ากับ $648.4 \mu F$ ทั้งนี้เราเลือกที่จะใช้งานที่ $750 \mu F$ ที่แรงดันขนาด 450 โวลต์ และไดโอดที่ใช้งานต้องทนกระแสได้มากกว่า 1.5 เท่าของกระแสกระแสตรงนั้นก็หมายความว่า ควรเลือกไดโอดที่มีความทนกระแสได้เท่ากับ 3 แอมป์ และแรงดันต้องมีขนาดมากกว่า 450 โวลต์

การทำงานเริ่มแรกของการเปิดไฟโหลดเข้าระบบนั้นจะเกิดปัญหาหลักคือ เมื่อเริ่มต้นทำงานโดยการสับสวิทช์เข้านั้น ตัวเก็บประจุในสถานะเริ่มต้นจะมีการลัดวงจรในขณะเปิด เพราะฉะนั้นถ้าต้องการลดกระแสกระชากนี้นั้น จึงต้องมีการแก้ปัญหาโดยการนำเอาค่าความต้านทานไปอนุกรมกับสายนำกระแสซึ่งเมื่อเราเริ่มสับสวิทช์นั้น แทนที่กระแสจะมีค่าสูงเนื่องจากมีตัวเก็บประจุตัวเดียว กระแสจะไหลผ่านตัวต้านทานนั้น หลังจากกระแสไหลเข้าจนแรงดันคงที่ เราจะทำการสับสวิทช์ไปที่ตำแหน่งที่ปราศจากตัวต้านทาน ทั้งนี้เพื่อลดค่าการสูญเสียในระบบให้เหลือน้อยที่สุด เนื่องจาก ตัวต้านทานจะทำให้เกิดความร้อนที่สะสมเนื่องจาก I^2R

ส่วนสุดท้ายที่ต้องคำนึงถึงคือ การออกแบบตัวต้านทานท้าย (Dummy load) ตัวต้านทานนี้มีหน้าที่ในการรับการคายประจุจาก ตัวเก็บประจุ เมื่อกรณีที่ ปิดวงจร โดยฉับพลัน ความหมายคือ ถ้าไม่มีตัวต้านทานตัวนี้ แรงดันที่ ตัวเก็บประจุยังคงมีแรงดันที่ตกคร่อมอยู่ ตัวต้านทานตัวนี้มีค่ากำลังสูงมากยิ่งขึ้นเนื่องจากจะยังคงรับ โหลดตลอดเวลา จากสมการด้านล่างจะเป็นตัวกำหนดขนาด และกำลังที่ตัวต้านทานต้องรับ ถ้าเลือกค่าความต้านทานขนาด 15 กิโลโอห์ม

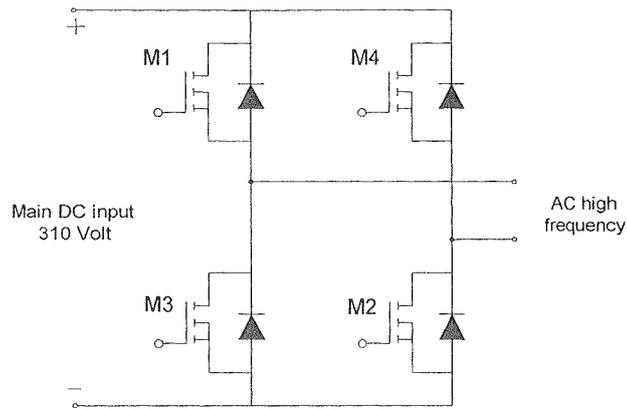
$$\begin{aligned}
 P &= \frac{V^2}{R} & (3.4) \\
 &= \frac{310^2}{15 \times 10^3} \\
 &= 6.41 & \text{วัตต์}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นเราควรเลือก ค่าความต้านทานนี้ที่ค่า 15 กิโลโอห์ม 10 วัตต์ หรือ มากกว่า

3.4 อินเวอร์เตอร์

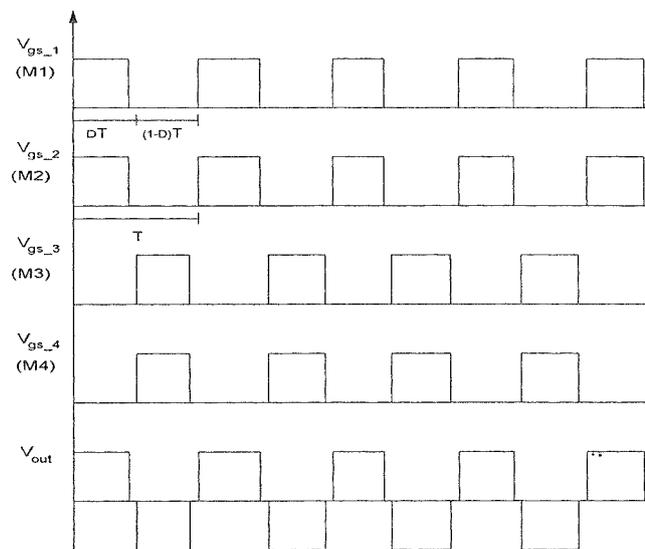
พื้นฐานของการแปลงระบบไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นกระแสสลับนั้นเราจะทำการแปลงโดยให้อินเวอร์เตอร์ การออกแบบอินเวอร์เตอร์นั้นหลักๆ อยู่ที่ขนาดของกำลัง(วัตต์) ที่เราใช้งาน รูปแบบการสวิทช์ THD และอีกหลายๆ อย่างที่จะกล่าวต่อไป

การออกแบบอินเวอร์เตอร์ ที่ใช้งานในที่นี้เน้นใช้ความถี่ในการสวิตช์ ที่ 60 kHz เป็น ฟลูบริจอินเวอร์เตอร์ ซึ่งการออกแบบนี้นั้นเหมาะสมกับขนาดของแรงดันสูง กำลังตั้งแต่ 400 - 2000 วัตต์ขึ้นไป จากภาพประกอบที่ 3.3 แสดงให้เห็นการจัดเรียงของมอสเฟต จำนวน 4 ตัว



ภาพประกอบที่ 3.3 วงจรการจัดเรียงมอสเฟต

ถ้าสังเกตถึงการจัดรูปแบบของตัวสวิตชิง ต่างๆ นั้นจะเห็นว่า M1 และ M2 จะทำงานพร้อมกัน ที่ความถี่ 60 kHz แต่ละจะมีค่า Duty Cycle ไม่เกินตัวเลข 0.5 หรืออีกความหมายก็คือ ต้องมีค่าน้อยกว่า 0.5 นั่นเอง ในทำนองเดียวกันนี้ M3 และ M4 ก็จะมีค่าได้ไม่เกิน 0.5 เช่นกัน หลักการของการทำงาน ของสวิตซ์ทั้ง 4 ตัวนี้จะเป็นไปตามรูปด้านล่าง



ภาพประกอบที่ 3.4 รูปสัญญาณการทำงานของมอสเฟต

สาเหตุหลักของการจำกัดขอบเขตของ Duty Cycle ของแต่ละชุดก็คือ ถ้าสังเกตจากรูปแล้วนั้น M1 และ M3 ทำงานพร้อมกันไม่ได้ ในทำนองเดียวกัน M4 และ M2 ก็ไม่สามารถที่จะทำงานพร้อมกัน ได้เนื่องจาก หากคู่ใดคู่หนึ่งเกิดทำงานพร้อมกันขึ้นมา จะเกิด การลัดวงจรขึ้นทันที การลัดวงจรนี้นั้นจะ

เกิดขึ้นและแรงที่สุด เนื่องแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์ ทั้งสองตัวในกลุ่มของมันมีค่าสูงถึง 310 โวลต์ ดังนั้น กระแสจะมีค่าสูงมาก

จากหลักการทำงานเบื้องต้นของอินเวอร์เตอร์แบบฟลูบริดจ์นั้น เป็นพื้นฐานในการแปลง กระแสตรงเป็นกระแสสลับ การเลือกมอสเฟตพร้อมทั้งชุดขับจึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างมากในการ ออกแบบระบบโดยรวม

มอสเฟตที่มีขายอยู่ในท้องตลาดจะมีหลายรูปแบบ มีทั้งแบบเดี่ยว อย่างเช่นมอสเฟต ตระกูล IR ซึ่งเป็นที่นิยม แพร่หลายกับการใช้งานในระดับการทดลอง การที่เลือกใช้งานมอสเฟต โดยหลักการ เลือก แรงดันและกระแส จะเป็น ตัวเลือกแรกของการกำหนดอุปกรณ์นั้นๆ

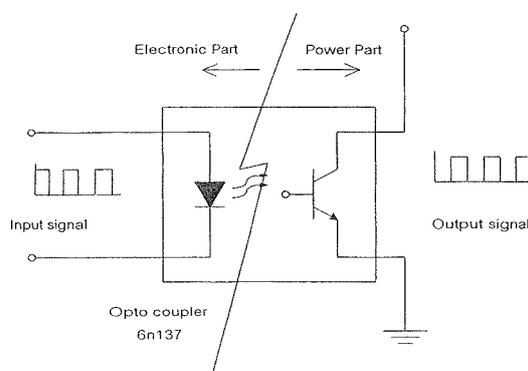
จากการคำนวณกระแสที่ไหลผ่านตัวมอสเฟต เนื่องจากแรงดันที่เราใช้งานอยู่ที่ 310 โวลต์ ขนาดของเอาต์พุต สูงสุดเท่ากับ 500 วัตต์ กระแสสูงสุดที่ไหลผ่านมอสเฟตตัวนี้จะมีค่าเท่ากับ 1.7 แอมป์ ในที่นี้ได้เลือก IRFP 460 ซึ่งตาม Datasheet แล้วนั้นทนกระแสได้ถึง 4 แอมป์ แรงดันที่สามารถ ใช้งาน ได้จะอยู่ระดับ 600 โวลต์

การใช้งานชุดขับมอสเฟต สามารถแบ่งออกเป็นทั้งหมด 4 ส่วน

1. ตัวแยกทางไฟฟ้า: การแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างด้านกำลังและทางด้านอิเล็กทรอนิกส์
2. ด้วยกระดပ်แรงดัน: ส่วนของการปรับระดับแรงดันให้เข้าสู่ระดับที่เราต้องการ
3. ชุดขับมอสเฟต: ส่วนนี้จะมีหน้าที่ตรงในการขับมอสเฟตซึ่งจะมีสัญญาณขับชุดล่างและบน
4. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง: ทำหน้าที่จ่ายแรงดัน ไปเลี้ยงส่วนต่างๆ ของวงจร ไอซี

3.4.1 การแยกทางไฟฟ้า

การแยกกันทางไฟฟ้า มีความจำเป็นมากสำหรับแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิง เนื่องจากการแยกกัน ทางไฟฟ้างดักป้องกันการลัดวงจรซึ่งกันและกัน หรือเรียกง่าย ๆ ว่าเป็นระบบป้องกันอย่างหนึ่ง ในชุดที่ทำการทดลองนี้เลือกใช้ Opto Coupler เป็นตัวแยกทาง ไฟฟ้า การทำงานของ Opto Coupler นั้น จะทำงานด้วยแสง กล่าวคือถ้ามีสัญญาณทางด้านอินพุต แล้วนั้นจะเกิดแสงไปปิดวงจรอีกฝั่ง ดังนั้น วงจรอีกฝั่งจึงต้องมีแรงดัน หรือไฟเลี้ยงเสมอ อธิบายได้ดังภาพประกอบที่ 3.5



ภาพประกอบที่ 3.5 การทำงานของ Opto Coupler

สัญญาณที่ได้รับนั้นจะมีลักษณะสัญญาณตรงกันข้าม เพราะฉะนั้นการต่ออินพุต ต้องคำนึงถึง ส่วนนี้ด้วย ในกรณีนี้สามารถใช้ Buffer จำพวก 74HCxxx ต่อก่อนเข้า opto coupler ได้

การเลือกใช้งานในงานนี้นั้น เราเลือกใช้ High speed opto 6n137 ผลิตโดย บริษัท Sharps ถ้า สังเกตจาก Datasheet นั้น Opto Coupler รุ่นนี้นั้นจะทำงานหรือมี Rise time กับ Fall time ที่อยู่ในย่านที่ เราสามารถไปใช้งานได้

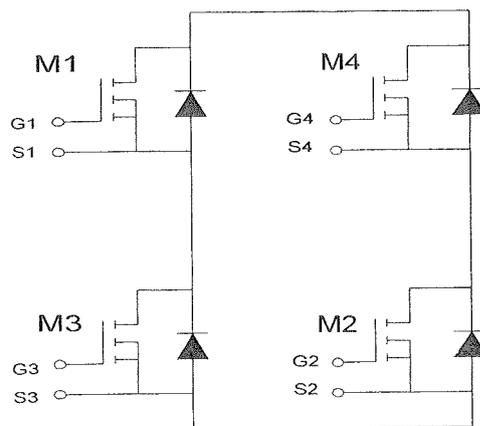
ปัญหาที่มักเจอกับ Opto Couple นั้นจะมีข้อเสียคือ การที่จะคงแรงดันไว้ที่ระดับ 5 โวลต์ เมื่อ เปิดเสมอถ้าไม่มีสัญญาณใดในฝั่งอินพุต เพราะฉะนั้นควรระวังเกี่ยวกับการที่มอสเฟต ในกึ่งจะทำงาน พร้อมกัน ทำให้เกิดการลัดวงจร และเสียหายได้

3.4.2 ตัวยกแรงดันไฟฟ้า

เป็นตัวแปลงสัญญาณแรงดันที่ได้รับจาก Opto Couple ซึ่งมีระดับแรงดันเพียง 5 โวลต์ ให้มีค่า เพิ่มขึ้นไปอยู่ในระดับ 15 โวลต์ ใช้สำหรับการปรับแรงดันเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานกับ Driver chip ทั้งนี้การแปลงระดับสามารถปรับได้มากกว่าระดับ 15 โวลต์ ขึ้นอยู่กับ ไฟเลี้ยงที่ป้อนให้แก่ ตัว ยกแรงดันไฟฟ้า นี้ ในงานวิจัยนี้เราเลือกที่จะใช้งาน CMOS แบบ MC14504 ของบริษัท Motorola ซึ่งสามารถใช้งานได้ง่ายไม่ซับซ้อน มีความสามารถที่จะปรับระดับสัญญาณได้ 4 สัญญาณ พร้อมกันใน 1 ตัว

3.4.3 ชุดขับมอสเฟต

ในการที่จะทำการขับมอสเฟตนั้น เราจะต้องให้ความสนใจทั้ง ระดับแรงดัน และ กระแสที่ เหมาะสมกับมอสเฟต ชนิดนั้นๆ ในที่นี้สัญญาณ PWM ทั้งสี่จะถูกต่อกับ IR2110 ซึ่งเป็นที่นิยม แพร่หลายในท้องตลาด การทำงานของ ตัวขับมอสเฟต ตัวนี้นั้นจะทำการต่อโดยตรงกับมอสเฟต ที่เรา ใช้งาน ตามที่บริษัท IR International กำหนด Datasheet 1 ตัว สามารถที่จะขับมอสเฟตได้สองตัวใน รูปแบบของ High กับ Low ความหมายก็คือ ใช้งาน IR2110 2 ตัว

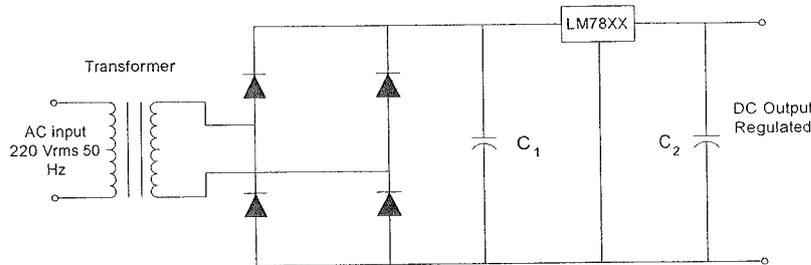


ภาพประกอบที่ 3.6 วงจรสวิตช์มอสเฟต

กล่าวคือ IR2110 ตัวที่ 1 จะต่อ High (G1 S1) เข้ากับเกทของมอสเฟต ตัวที่ 1 สัญญาณ Low (G3 S3) ตัวที่ 1 จะต่อ เข้ากับมอสเฟต ตัวที่ 3 ถ้าสังเกตตามรูป สัญญาณ Low มักจะต่อ Source ของมอสเฟต ตัวนั้นกับ Ground เสมอ ส่วน High จะมีลักษณะ Ground ลอย การทำงานของชุดขับ ตัวที่สองจะทำงานในลักษณะที่เหมือนกับตัวที่หนึ่ง กล่าวคือ การทำงานของชุดขับ ตัวที่ 2 สัญญาณ High (G4 S4) จะต่อเข้ากับมอสเฟตตัวที่ 4 และ Low(G2 S2) จะต่อกับมอสเฟต ตัวที่ 2 ซึ่ง Source ของมอสเฟต ตัวที่ 2 จะต่อกับ Ground เสมอตามที่กล่าวข้างต้น

3.4.4 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงมีความสำคัญอย่างมากในการขับมอสเฟต กล่าวคือ ถ้าออกแบบอย่างไรไม่เหมาะสมแล้วนั้น บางครั้งกระแสอาจจะไม่พอสำหรับการใช้งาน ในการออกแบบแหล่งจ่ายไฟให้กับชิป ต่างๆนั้นเราจะให้หม้อแปลงแบบที่แปลงแรงดันขนาด 220 โวลต์ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 15 โวลต์ และ 5 โวลต์ ตามลำดับ จากรูปด้านล่างจะเห็นว่าจะมีการแยกระบบอย่างชัดเจน โดยการแยกนั้นต้องคำนึงถึง Ground ของระบบด้วย ว่าเราใช้ไฟเลี้ยงกับ ระบบใด ถ้าใช้กับ ARM7 LPC2138 เราก็ต้องทำการแยกหม้อแปลง ให้ไม่มีการต่อ Ground ร่วมกันกับระบบของ ไฟเลี้ยงทางด้าน กำลัง เนื่องจากถ้ามีการต่อทางไฟฟ้า หรือการเชื่อมเส้นถึงกัน ถ้ามีการลัดวงจร ระบบทั้งหมดจะพังหรือเกิดการเสียหายพร้อมกัน



ภาพประกอบที่ 3.7 วงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง

การคำนึงถึงการออกแบบ หลักๆแล้วนั้นต้องมีการตรวจสอบการใช้งานไฟเลี้ยงในระบบให้ครบซะก่อน แล้วทำการออกแบบตัวปรับแรงดันว่าควรใช้งาน ตัวรักษาระดับแรงดันชนิดไหน ในที่นี้เราใช้ LM7815 เพื่อรักษาระดับแรงดัน 15 โวลต์ และ LM7805 เพื่อรักษาระดับแรงดันขนาด 5 โวลต์ โดยที่ต่อ LED ไว้ด้านท้ายเพื่อที่จะตรวจสอบระดับแรงดันว่าเริ่มใช้งานหรือยัง

3.5 หม้อแปลงความถี่สูง

หม้อแปลงความถี่สูง มีความสำคัญต่อแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิง เป็นอย่างมากเมื่อที่ต้องการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้า สำหรับหัวข้อนี้จะอธิบายถึงหลักการ พื้นฐานของการออกแบบหม้อแปลงแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิง ในวงจรของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิงแบบฟลูบริดจ์ การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง

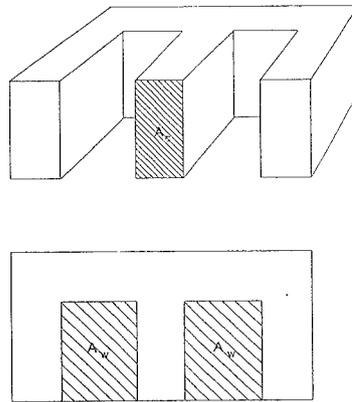
โดยทั่วไปแล้วนั้น ในการออกแบบหม้อแปลงความถี่สูงนิยมที่จะใช้วิธีการออกแบบ แบบ Area product ซึ่งนิยามสมการได้ดังนี้

$$A_p = \text{Area product} = \text{core cross section}(A_c) \times \text{window area}(A_w)$$

เมื่อ A_c หมายถึง พื้นที่หน้าตัดของแกน (core area)

A_w หมายถึง พื้นที่ภายในกรอบว่างของแกน (window area)

ในกรณีที่เลือกใช้แกน E จะมีลักษณะตามรูปด้านล่าง



ภาพประกอบที่ 3.8 ลักษณะพื้นที่หน้าตัดของแกน

จากสมการ (2.12) พื้นฐานของการคำนวณวงจรถูบริดจ์ แบบ Area product

$$A_c A_w = \frac{(0.68 P_{out} D) 10^3}{f B_{max}}$$

ความหนาแน่นกระแส (D) ในทางปฏิบัติจะเลือกใช้ความหนาแน่นกระแส 500 cm/A

ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กสูงสุด (B_m) ของแกนเฟอร์ไรต์ ที่ใช้มีค่าประมาณ 1200 – 1600 G

จากการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆของวงจรถูบริดจ์ จะมีค่าตามรายละเอียดด้านล่าง

แรงดันเอาต์พุต	(Output voltage)	70	โวลต์
แรงดันริปเปิ้ลเอาต์พุต	(Output ripple voltage)	10	เปอร์เซ็นต์
กระแสเอาต์พุต	(Output current)	10	แอมป์
ความถี่สวิตซิง	(Switching frequency)	60	kHz
แรงดันอินพุต	(Input voltage)	310	โวลต์

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ (2.12) ทำให้ได้ค่า} \quad A_c A_w &= \frac{(0.68 \times 600 \times 500) 10^3}{60 \times 10^3 \times 1200} \\ &= 2.833 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

การเลือกขนาดของแกน ทำการเลือกแกนเหล็กจากตารางในภาคผนวก

เราจะได้แกนแม่เหล็กเบอร์ EE42/42/15 ที่มีค่า $A_c = 1.82 \text{ cm}^2$, $A_w = 1.78 \text{ cm}^2$

ทำให้ได้ $A_c \cdot A_w = 1.82 \times 1.78 = 3.239 \text{ cm}^4$

การคำนวณจำนวนรอบในการพันด้านปฐมภูมิ

$$N_p = \frac{[V_m - 2V_{DS}] t_{on} \times 10^8}{A_c B_m} \quad (3.5)$$

ค่า t_{on} ได้จากการหาจากสมการ (3.6)

$$t_{on} = \frac{D_{eff} T}{2} = \frac{D_{eff}}{2f} \quad (3.6)$$

$$t_{on} = \frac{0.8}{2 \times 60 \times 10^3}$$

$$t_{on} = 6.66 \text{ } \mu\text{s}$$

ค่า V_{DS} หาจากผลคูณระหว่างกระแสสูงสุดกับค่าความต้านทานขณะนำกระแสของมอสเฟต จากตาราง

ในภาคผนวก 1 $V_{DS} = I_D r_{DS} \quad (3.7)$

$$V_{DS} = 20 \times 0.27 = 5.4 \text{ v}$$

แทนค่าตัวแปรต่างๆ ลงในสมการ (3.5) เราจะได้

$$N_p = \frac{[310 - 2(5.4)] 6.66 \times 10^{-6} \times 10^8}{1.82 \times 1200}$$

$$N_p = 91.24 \text{ รอบ}$$

จากการคำนวณได้จำนวนขดลวดการพันทางด้านปฐมภูมิ ที่ 91.24 รอบ เพื่อให้ค่า N มีค่าลงตัวโดยการ

ปัดเศษได้เท่ากับ 93 รอบ เป็นผลให้คำนวณจำนวนขดลวดการพันทางด้านทุติยภูมิ ตามสมการ (2.5)

โดยกำหนดค่าแรงดันทางด้านทุติยภูมิ 70 โวลต์ เพื่อคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดและค่ากระแส

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s}$$

$$N_s = \frac{V_s}{V_p} N_p$$

$$N_s = \frac{70}{310} \times 93 = 21 \text{ รอบ}$$

การคำนวณค่ากระแสทางด้านทุติยภูมิ คัดจากค่ากำลังงานของหม้อแปลงที่ต้องการ 500 วัตต์ 48 โวลต์

ได้ค่ากระแส 10.4 แอมป์ คิดเพิ่มอีก 25 เปอร์เซ็นต์ ได้ค่ากระแส 13 แอมป์ นำไปหาค่ากระแสทางด้าน

ขดลวดปฐมภูมิจากสมการ $\frac{I_2}{I_1} = \frac{V_p}{V_s} \quad (3.8)$

$$I_1 = \frac{V_s}{V_p} I_2$$

$$I_1 = \frac{70}{310} \times 13 = 2.935 \text{ A}$$

การเลือกขนาดของขดลวดตัวนำ (AWG) จากตารางในภาคผนวก

ค่ากระแสทางด้านขดลวดปฐมภูมิ 2.935 แอมป์ ใช้ขดลวดตัวนำขนาดเบอร์ 24 ทนกระแสได้ 3.5 แอมป์

ค่ากระแสทางด้านขดลวดทุติยภูมิ 13 แอมป์ ใช้ขดลวดตัวนำขนาดเบอร์ 18 ทนกระแสได้ 16 แอมป์

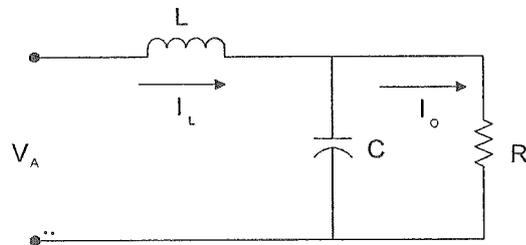
3.6 วงจรเรียงกระแสด้านเอาต์พุต พร้อมกับวงจรกรองแรงดัน

ในกรณีของวงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟลูบริดจ์ นั้นจะมีรูปแบบของแรงดันที่ด้านเอาต์พุต จะเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม ดังตัวอย่างที่กล่าวไปแล้วนั้น การส่งผ่านแรงดันที่ทางด้านอินพุตของหม้อแปลง ความถี่สูง ที่ความถี่ 60 kHz สัญญาณแรงดันที่เอาต์พุต ของหม้อแปลงนั้น ควรจะมีรูปร่างที่เหมือนแรงดันที่ป้อนเข้าด้านอินพุตเสมอ

เนื่องจากรูปแบบของสัญญาณมีความถี่สูงในระดับ 60 kHz วงจรเรียงกระแสเอาต์พุต ก็ควรที่จะมีความเร็วสูง เพื่อตอบสนองระบบได้ การใช้งานในส่วนของการแปลงแรงดัน ที่มีรูปแบบของสัญญาณสี่เหลี่ยม นั้นจะต้องเลือกไดโอดที่มีลักษณะที่ตอบสนองความถี่นั้นๆ ได้

3.6.1 การออกแบบวงจรกรองแรงดัน RLC

เนื่องจากแรงดันที่ได้จากการใช้ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟลูบริดจ์ จะอยู่ในรูปแบบของแรงดันที่เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมดังภาพประกอบที่ 3.9 ซึ่งเป็นกระแสสลับ ทั้งนี้ แรงดันที่เราต้องการเป็นรูปแบบของแรงดันกระแสตรง ที่มีค่าริปเปิ้ลอยู่ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ของขนาดของกระแสด้านเอาต์พุต จึงต้องมีการกรองแรงดันมีสัญญาณของกระแสสลับออกไป เพื่อให้เหลือแค่ค่าแรงดันที่เป็นกระแสตรงเท่านั้น การกรองนั้นมีหลายรูปแบบ แต่แบบที่เป็นที่นิยมแพร่หลายมากก็คือการกรองแบบ Passive ที่ประกอบด้วยตัวกรองแบบ RLC



ภาพประกอบที่ 3.9 วงจรกรองแรงดัน RLC

3.6.1.1 การคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำ

คำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการสำหรับแหล่งจ่ายไฟสวิตชิงแบบฟลูบริดจ์

$$L = \frac{V_o(1 - D_{\min})}{\Delta I f_s} \quad (3.10)$$

เมื่อกำหนดให้ความต้องการของกระแสริปเปิ้ล (ΔI) อยู่ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ของกระแสโหลด

ดังนั้นเมื่อกำหนดกระแสไหลคอยู่ที่ 5 แอมป์ $\Delta I = 0.5$ แอมป์ โดยที่

$$D_{\min} = \frac{V_o}{V_{in,\max}} \quad (3.11)$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างจะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำเท่ากับ

$$L = 222.88 \mu\text{H}$$

คำนวณหาผลคูณพื้นที่ (A_p)

เริ่มต้นคำนวณพลังงานสะสม

$$E = \frac{1}{2} LI_m^2 \quad (3.12)$$

โดย

$$I_m = I_o + \frac{\Delta I}{2} \quad (3.13)$$

แทนค่าสมการด้วยตัวแปรต่างๆ จะได้

$$E = 0.012 \text{ J}$$

สามารถแทนค่าสมการ $B_m = 0.2$ เทสลา $J = 3 \text{ A/mm}^2$ $K_c = 1$, $K_w = 1$

$$A_p = A_w A_c = \frac{2E}{K_w K_c J B_m} \quad (3.14)$$

$$A_p = 4 \times 10^{-8} \text{ m}^4 \text{ หรือ } 40,000 \text{ mm}^4$$

เลือกขนาดแกน โดยเลือกค่าที่มีค่ามากกว่าค่าที่คำนวณได้ $40,000 \text{ mm}^4$ จะได้แกนเบอร์ P42/26 ($A_p = 4.77 \times 10^4 \text{ mm}^4$, $A_c = 2.64 \times 100 \text{ mm}^2$, $A_w = 1.81 \times 100 \text{ mm}^2$)

3.6.1.2 คำนวณหาค่าตัวเก็บประจุ

การกรองแรงดันเอาต์พุตให้อยู่ในรูปแบบของกระแสตรงนั้นเราจะต้องใช้ตัวเก็บประจุ เป็นตัวกรอง เนื่องจากคุณสมบัติของตัวเก็บประจุ มีหน้าที่ในการกรองแรงดันกระแสสลับและทั้งนี้รีปเปิ้ลเอาต์พุตของแรงดันจะขึ้นอยู่กับตัวแปรความถี่และโหลดด้วย การคำนวณนี้มีความสำคัญมาก เนื่องจากการป้อนสัญญาณกลับต้องอาศัยแรงดันที่มีค่ารีปเปิ้ลน้อยมากที่สุดเท่าที่จะทำได้จากสมการ (3.15)

$$C = \frac{V_o}{\Delta V_o} \cdot \frac{(1-D)}{8 f_s^2 L} \quad (3.15)$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆ จะได้ค่าตัวเก็บประจุ

$$C = 0.264 \mu\text{F}$$

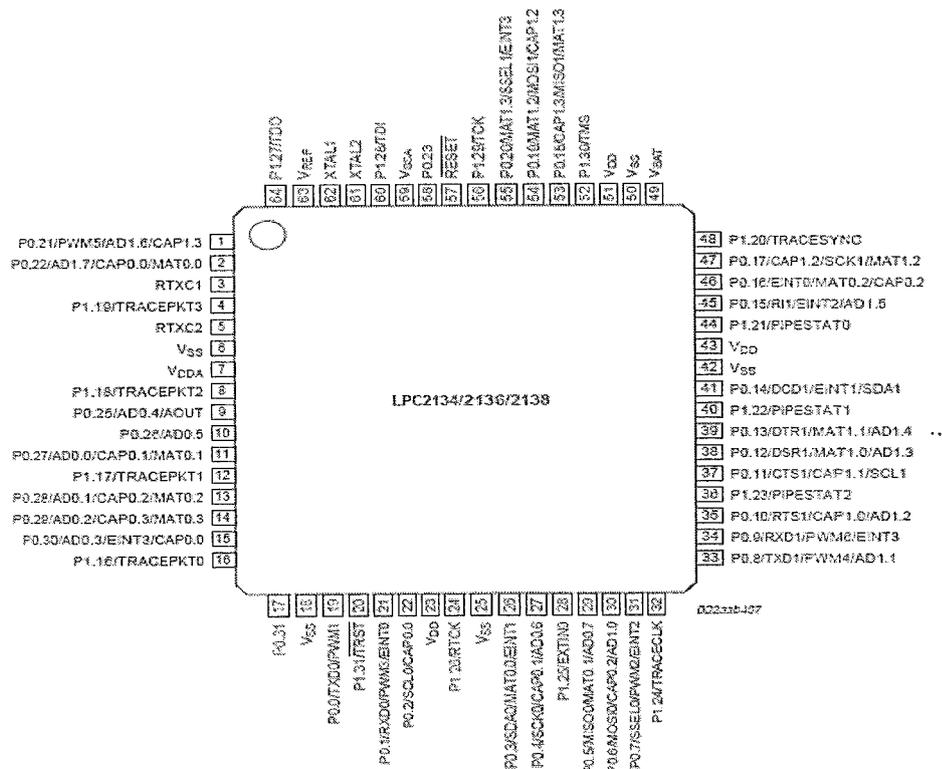
ที่แรงดันรีปเปิ้ล 10 เปอร์เซ็นต์จากการคำนวณค่าที่จะเลือกใช้งานต้องมีค่ามากกว่า $0.264 \mu\text{F}$

3.7 ตัวประมวลสัญญาณแบบ ARM7 LPC2138

ตัวประมวลสัญญาณ ARM7 โดยบริษัท Phillips ที่ใช้ในการควบคุมแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิ่งนั้น ทางผู้วิจัยได้ใช้รุ่น LPC 2138 ซึ่งจะมีความสามารถดังนี้

- 32 Bit Microprocessor based on RISC
- 512 KB Flash memory
- 32 Bit Static RAM (SRAM)
- ADC: Dual 8 channels 10 Bit (conversion time = 2.44 μ s/channel)
- DAC: Single 10 Bit
- PWM: 6 channels single edge or 3 double edge
- 47 of GPIO pins (5V tolerance)
- UART: 2 Serial UART0 and UART1
- SPI: 4 Standard serial Interfacing
- I²C: 2 fast serial interfacing 400kb/s

ภาพประกอบที่ 3-10 จะแสดงตัวประมวลสัญญาณ LPC2138 AMR7 โดยบริษัท Phillips โดยการประมวลสัญญาณจะใช้ PWM เอาต์พุต ซึ่งมีด้วยกันทั้งหมด 6 ขา สามารถแบ่งการใช้งานเป็น Double edge 3 ขา



ภาพประกอบที่ 3.10 ตัวประมวลสัญญาณ LPC2138

การใช้งานแหล่งจ่ายไฟแบบฟลูบรีคชันนั้น จะมีสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ประมวลสัญญาณเพียง 2 ขา คือ p0.7 และ p0.8 หรือ pwm2 และ pwm4 แบบ Double edge นั้นเอง ขนาดของแรงดันสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ได้จากการโปรแกรมผ่านทาง ภาษาซีจะมีขนาดเพียง 3.3 โวลต์ การกำหนดค่า Duty cycle ของ PWM จะถูกโปรแกรมให้มีค่าตามข้อกำหนด กล่าวคือ แรงดันที่ด้านท้ายของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิงจะถูกควบคุมโดยตัวประมวลสัญญาณนั่นเอง

3.7.1 การแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล

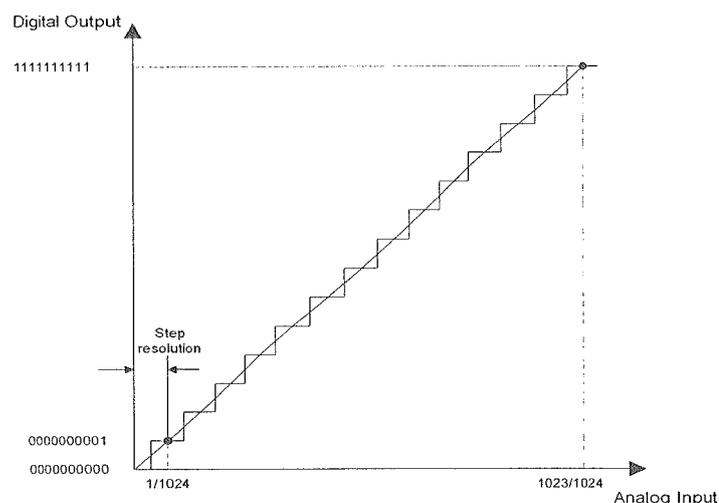
การแปลงสัญญาณที่มีความต่อเนื่องของเวลาเป็นสัญญาณที่จะใช้กับตัวประมวลผลทาง ดิจิตอล นั้นจำเป็นต้องต้องมีการ Sampling ของสัญญาณที่ต่อเนื่องนั้นๆ ออกเป็นขั้นหรือการ Sampling and Hold ค่านั้นๆไว้ เนื่องจาก LPC2138 AMR7 controller นั้นจะมี ขาสำหรับการแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลในตัวอยู่แล้ว แต่หลักการของการแปลงจะขึ้นอยู่กับ การเขียน โปรแกรม และการกำหนดค่าต่างๆ ในโปรแกรมนั้นๆ

การทำงานของตัวแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล นั้นจะอยู่ในรูปแบบของการรับค่าของแรงดันที่ระดับ 0 - 3.3 โวลต์ ตามที่เรากำหนดตัวแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล ใน LPC2138 AMR7 controller นั้นมีขนาด 10 บิตซึ่งค่าสูงสุดของแรงดันเทียบเท่ากับ 3.3 โวลต์ ค่าของ Digital number จะมีค่าทั้งหมด 1024 ค่า ความละเอียดของแรงดันที่ได้จะอยู่ในรูปแบบสมการ(3.16)

$$ADC_{resolution} = \frac{V_{ref}}{2^n} \quad (3.16)$$

$$ADC_{resolution} = 0.00322 \text{ โวลต์}$$

ความละเอียดของระดับแรงดันในการใช้งานตัวแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล ตามค่าที่คำนวณได้จะมีลักษณะตามภาพประกอบที่ 3.11



ภาพประกอบที่ 3.11 ตัวแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล

ดังนั้นค่าที่เราจะได้สูงสุดที่ป้อนเข้าตัวแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลนั้นจะมีค่าเท่ากับ

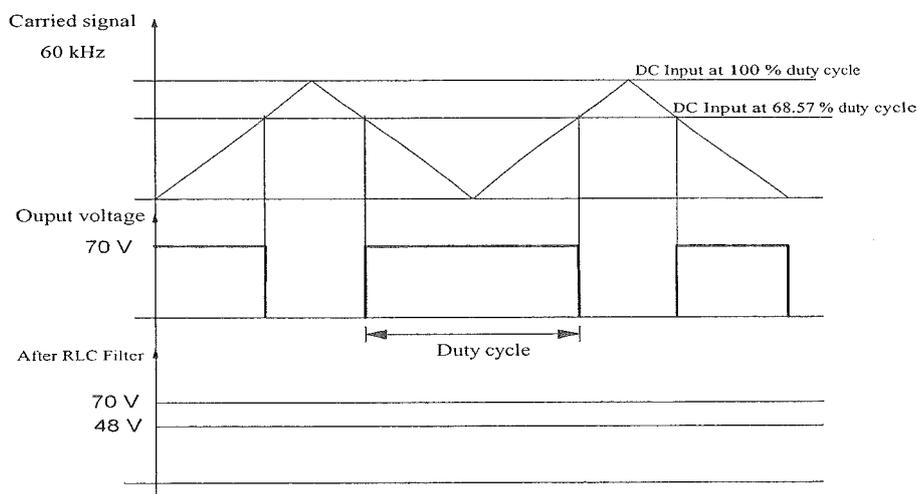
$$V_{DC,max} = \frac{V_{ref} \cdot 1023}{1024} = 3.296 \text{ volt} \quad (3.17)$$

การทำงานโดยการป้อนแรงดันย้อนกลับเข้าสู่ชุด PWM ที่ขับมอสเฟตนั้นจะต้องป้อนผ่าน โปรแกรมที่กำหนดระดับแรงดันที่เราต้องการ ในการออกแบบ smps นั้น เราตั้งค่าที่จะป้อนกลับนั้นมีค่าเท่ากับระดับแรงดัน 48 โวลต์ เพราะฉะนั้น การกำหนดระดับแรงดันเป็นสิ่งสำคัญมากในการป้อนกลับ ทั้งนี้การต่อตัวแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลของวงจรที่ใช้งานอยู่ต้องพึงระวังเกี่ยวกับเรื่องของการ Float ของ Ground แรงดันที่เราทำการป้อนด้วย

3.7.2 สัญญาณป้อนกลับ

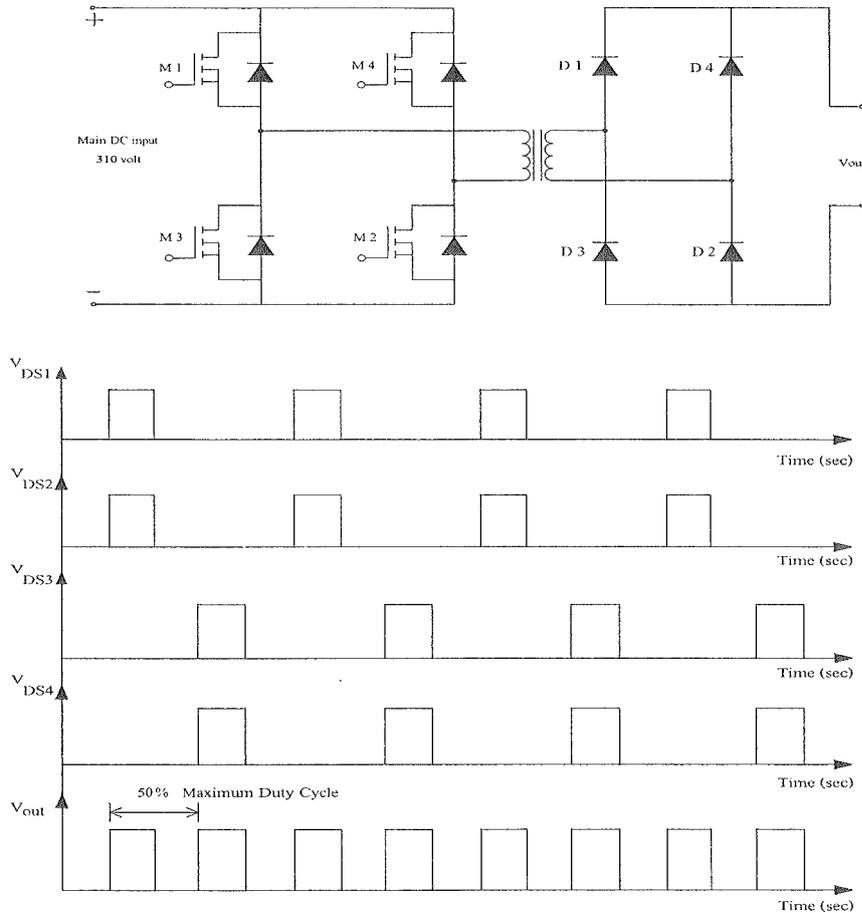
หลักทั่วไปของการส่งสัญญาณเข้าตัวควบคุมแบบ ARM7 เพื่อป้อนกลับนั้น เนื่องจากดังที่กล่าวมาแล้วว่าตัวแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล ของตัวควบคุมแบบ ARM7 นั้นประกอบอยู่ในตัวควบคุมและถูกจำกัดความสามารถในการรับแรงดันอยู่ที่ระดับ 0 - 3.3 โวลต์ ดังนั้นการป้อนกลับของแรงดันที่เข้ามาควบคุมแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิง หรือ Duty cycle ของมอสเฟต นั้นๆ จะต้องลดระดับแรงดันลงมาให้สอดคล้องกับข้อกำหนดของ ตัวแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล ด้วย ดังตัวอย่างด้านล่างในการคำนวณการป้อนกลับของสัญญาณที่ระดับแรงดันสูงสุด

แรงดันจะมีค่าสูงสุดก็ต่อเมื่อแรงดันเอาต์พุต จะมีค่าเท่ากับ 70 โวลต์ หรือ Duty cycle 100 เปอร์เซ็นต์ และ แปรตามลำดับ คือ ถ้าแรงดันด้านออกมีค่า 48 โวลต์ ค่า duty cycle จะมีค่าเท่ากับ 48/70 คูณด้วย 100 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่าเท่ากับ 68.57 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพประกอบที่ 3.12



ภาพประกอบที่ 3.12 การคำนวณการป้อนกลับของสัญญาณที่ระดับแรงดันสูงสุด

การทำงานของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิง นั้นเราต้องการสัญญาณที่เหมือนกัน ความหมายก็คือ เราต้องการสัญญาณที่เหมือนกันแต่มีมุมแตกต่างกันที่มุม 180 องศา ตามภาพประกอบที่ 3.13

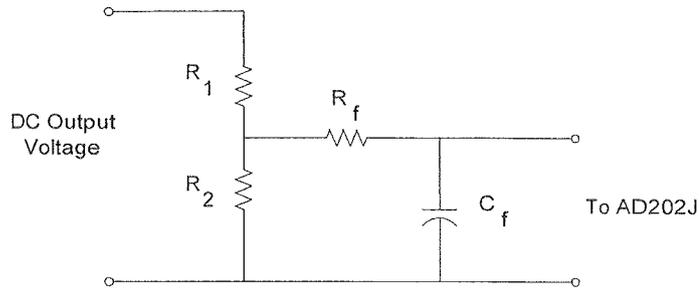


ภาพประกอบที่ 3.13 รูปแบบสัญญาณการสวิตช์ของมอสเฟต

จากภาพประกอบที่ 3.13 เราจะเห็นได้ว่าระดับแรงดันที่ป้อนกลับนั้นสูงสุดจะอยู่ที่ระดับ 3.3 โวลต์ ซึ่งมีค่าป้อนเข้าอนาล็อกอยู่ 1024 แต่ละระดับแรงดันที่แท้จริงจะถูกจำกัดให้มีระดับแรงดันที่ครึ่งเดียวคือ 1.75 โวลต์ เพื่อให้เกิดการสวิตช์ Duty cycle < 50 เปอร์เซ็นต์ ที่ไม่ทับกันระหว่าง M1, M3 หรือ M4, M2

จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจะนำไปสู่การออกแบบป้อนกลับที่ต้องการจำกัด ค่าของแรงดันที่จะสามารถป้อนเข้าได้ ทั้งนี้การจำกัดแรงดันที่จะแบ่งแรงดันมา นั้นจะมีค่าที่ไม่ควรเกินค่า 1.75 โวลต์

ตามภาพประกอบที่ 3.14 นั้นจะทำการแปลงแรงดันที่มีขนาด 70 โวลต์เหลือแรงดันที่ 1.75 โวลต์ โดยใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้เป็นตัวปรับจูนความละเอียดของแรงดันที่จะป้อนกับเข้า ตัวแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล การปรับค่าแรงดันนั้นจะถูกส่งผ่านเข้าตัวแยกทางไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ในการแยกทางไฟฟ้าระหว่างแรงดันเอาต์พุตและในส่วนของตัวประเมินผล LPC2138 ตัวแยกทางไฟฟ้าตัวนี้นั้นเราเลือกใช้ AD202J ในระบบการป้อนกลับ เนื่องจากตัวแยกทางไฟฟ้าตัวนี้นั้นทำงานโดยการป้อนแรงดันด้านเอาต์พุตเป็นลักษณะค่าอิมพีแดนซ์สูงเมื่อมีการ ถัดวงจรที่ด้านเอาต์พุต กระแสการถัดวงจรนั้นจะไม่วิ่งไหลเข้ากลับไป ใน LPC2138 ซึ่งป้องกันปัญหาที่จะตามมาในระบบ



ภาพประกอบที่ 3.14 วงจรการแปลงค่าแรงดันกลับ

การคำนวณหาค่าตัวต้านทานต่าง ๆ นั้นต้องคำนึงถึงค่าที่กำลังที่เหมาะสมให้กับตัวต้านทานนั้นๆ ด้วย จากสมการด้านล่างกำหนดให้

$$V_{sense} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{output} \quad (3.18)$$

เมื่อกำหนดให้แรงดันที่ป้อนกลับ LPC2138 สูงสุดที่ 1.75 โวลต์ แรงดันด้านนอก มีค่าเท่ากับ 70 โวลต์ คำนวณหาอัตราส่วนของค่าความต้านทานได้

$$R_1 = 39R_2$$

3.8 การออกแบบตัวควบคุม พี ไอ ของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตซิง

จากการออกแบบระบบเปิดที่ผ่านมานั้น ณ. ขั้นตอนที่เราจะมาสนใจในส่วนของการออกแบบระบบปิดที่มีการชดเชยค่าผิดพลาดด้วยตัวควบคุมแบบ พี ไอ จากรูปด้านล่าง แรงดัน ผิดพลาดจะถูกป้อนกลับผ่านทางตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลของ LPC2138 ซึ่งจะมีทำการเปรียบเทียบกับระดับแรงดันที่ตั้งไว้ในโปรแกรม ซึ่งทั้งนี้มันจะมี ตัวชดเชยค่าความผิดพลาด จนให้ค่าความผิดพลาดนั้นมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ โดยรวมของระบบแล้วนั้น ตัวควบคุมแบบพี นั้นไม่สามารถทำงานตามลำพังได้ โดยที่จะชดเชยค่าความผิดพลาดให้เป็นศูนย์ เพราะฉะนั้นจึงต้องมีการเพิ่มตัวควบคุมแบบไอ ต่อแบบขนานเข้าไปด้วยเพื่อให้เกิดการชดเชยจนค่าความผิดพลาด สามารถเข้าใกล้ศูนย์ได้ การออกแบบเพื่อใช้งานในรูปแบบของการควบคุมโดยสัญญาณดิจิตอล นั้นจะต้องคำนึงถึงส่วนของการแปลงในรูปแบบตัวแปรเวลาให้อยู่ในรูปแบบของตัวแปรเชิงดิจิตอล จากสมการ 3.19 เป็นสมการของการต่อแบบขนานในแบบของตัวแปรตามเวลา

$$V_{out} = K_p e_p + K_i \int e_p dt + V_0(0) \quad (3.19)$$

ในที่นี้จะสามารถเขียนโปรแกรมเพื่อกำหนดให้ค่าของตัวควบคุมแบบ พี ไอ อยู่ในรูปแบบของตัวแปรเชิงดิจิตอลได้ ส่วนของตัวควบคุมแบบ Proportional นั้นสามารถแยกเขียนในตัวแปรเชิงเวลาได้ดังนี้

$$m(t) = K_p e_p(t) \quad (3.20)$$

ในเมื่อกำหนดให้ K_p คือค่าคงที่ เราสามารถแปลงให้อยู่ในรูปแบบของตัวแปรเชิงคิติดอล ได้ดังนี้

$$m_n = K_p e_n \quad (3.21)$$

ใช้สมการ Backward เราสามารถแปลงสมการให้อยู่ในรูปแบบของตัวแปรเชิงคิติดอล ดังนี้

$$m_{n-1} = K_p e_{n-1} \quad (3.22)$$

ผลต่างของสมการ(3.21) และ(3.22) จะได้ดังสมการด้านล่าง(3.23)

$$\Delta m = m_n - m_{n-1} = K_p (e_n - e_{n-1}) \quad (3.23)$$

จากการเขียนโปรแกรมที่สั่งงานตัวประมวลสัญญาณ LPC2138 นั้น เราจะใช้พื้นฐานจากสมการด้านบน เพื่อหาค่าของ K_p , e_p ตัวควบคุมแบบ Integral จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของตัวแปรเชิงเวลา ได้ ดังรูปแบบสมการด้านล่าง โดยการอินทิเกรตค่าของความผิดพลาด

$$m(t) = K_i \int e_p(t) dt \quad (3.24)$$

หลังจากการแปลงตัวแปรเชิงเวลาให้อยู่ในรูปแบบของ ตัวแปรเชิงคิติดอลแล้วนั้นเราจะ ได้รูปแบบของ สมการ ที่เกิดจากผลคูณของ e_p กับ Sampling time Δt . ที่จุด Sampling ต่างๆกัน

$$m_n = K_i \sum_{j=1}^n T e_j \quad (3.25)$$

เรานำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายขึ้น จะได้ดังสมการ (3.26)

$$m_n = K_i \sum_{j=1}^{n-1} T e_j + K_i T e_n \quad (3.26)$$

ในกรณีนี้

$$m_{n-1} = K_i \sum_{j=1}^{n-1} T e_j \quad (3.27)$$

ผลต่างของสมการ(3.26) และ (3.27) จะได้ดังสมการด้านล่าง (3.28)

$$\Delta m_n = m_n - m_{n-1} = K_i T e_n \quad (3.28)$$

ดังสมการที่ได้กล่าวข้างต้นแล้วนั้น เราสามารถหาผลรวมของตัวควบคุมแบบ พี ไอ เพื่อเขียนใน โปรแกรมสั่งงาน LPC2138 ได้ดังนี้

$$\Delta m_n = (\Delta m_n)_p + (\Delta m_n)_i \quad (3.29)$$

รวมสมการที่ (3.23) กับ (3.28) เราจะได้สมการในรูปตัวแปรเชิงคิติดอลเป็นสมการดังนี้

$$\Delta m = m_n - m_{n-1} = K_p (e_n - e_{n-1}) + K_i T e_n \quad (3.30)$$

$$\Delta m = (K_p + K_i T) e_n - K_p e_{n-1} \quad (3.31)$$

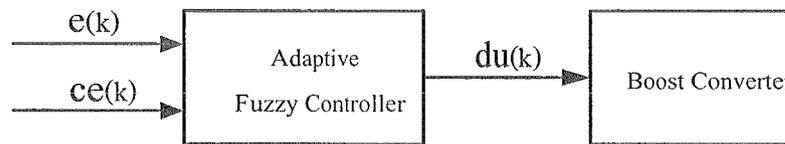
$$m_n = m_{n-1} + (K_p + K_i T) e_n - K_p e_{n-1} \quad (3.32)$$

3.9 การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี ของแหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิง

หลักการควบคุมแบบฟัซซี ใช้หลักการเดียวกับระบบควบคุมพีไอ ซึ่งโครงสร้างของระบบควบคุมฟัซซีลอจิกแบบปรับตัว ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ กลไกการเรียนรู้และตัวควบคุมฐานความรู้

3.9.1 กลไกการเรียนรู้ (Learning Mechanism)

กลไกการเรียนรู้ทำหน้าที่ปรับฐานความรู้ของตัวควบคุมฟัซซีพื้นฐาน โดยจะทำการปรับรูปฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตของตัวควบคุมฟัซซี ในการตอบสนองให้สอดคล้องกับสภาวะการทำงาน ในส่วนนี้นำมาปรับองค์ประกอบที่สำคัญของฟัซซี 2 องค์ประกอบ คือ การปรับขนาดของค่าความผิดพลาดและค่าการเปลี่ยนแปลงความผิดพลาด ส่วนเอาต์พุต คือ การเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันควบคุม (Change of control output: du) ตามภาพประกอบที่ 3.15



ภาพประกอบที่ 3.15 โครงสร้างการทำงานของตัวควบคุมฟัซซีลอจิก

ในการหาค่าความผิดพลาด โดยการตรวจจับค่าแรงดันด้านเอาต์พุต มาทำการคำนวณหาค่าความผิดพลาดและค่าการเปลี่ยนแปลงความผิดพลาด ได้จากสมการ (2.37) และ (2.38) จากนั้นกระบวนการฟัซซีลอจิก จะเป็นกลไกการควบคุม PWM โดยส่งสัญญาณควบคุมแรงดันออกมาตามสมการ (2.39) ซึ่งกลไกการควบคุม PWM หรือวงจรมุสต์คอนเวอร์เตอร์ จะคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขาออกและแรงดันขาเข้า เพื่อนำมาปรับอัตราสวิตช์ของมอสเฟต (Duty cycle) ตามสมการ (3.34) และมีความสัมพันธ์กับวงจรมุสต์คอนเวอร์เตอร์ ตามสมการ (3.35)

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (3.34)$$

$$L \frac{d_i}{d_t} + R_i = V \quad (3.35)$$

$$L \frac{d_i}{d_t} + R_i = -V \quad (3.36)$$

- เมื่อ V_o คือ แรงดันขาออกของมุสต์คอนเวอร์เตอร์
- V_i คือ แรงดันขาเข้าของมุสต์คอนเวอร์เตอร์
- D คือ Duty cycle
- V คือ แรงดันขาเข้าของอินเวอร์เตอร์
- L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของวงจรมุสต์คอนเวอร์เตอร์
- R คือ ค่าการต้านทานไฟฟ้าของวงจรมุสต์คอนเวอร์เตอร์

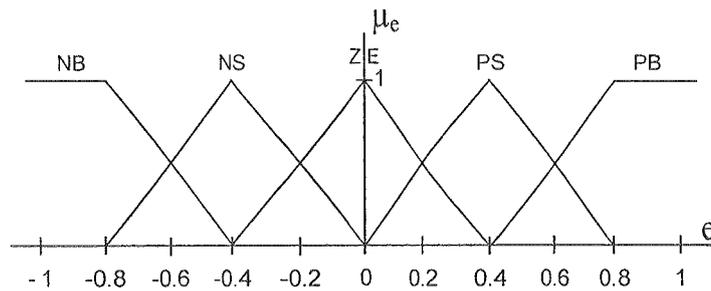
3.9.2 ตัวควบคุมฐานความรู้ฟัซซี (Fuzzy Knowledge Base Controller)

การออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี จะเป็นการกำหนดค่าแบบตัวเลข เพื่อนำไปใช้ในการแสดงเป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทางด้านเอาต์พุต ของกระบวนการควบคุมชุดของ PWM ซึ่งเป็นการควบคุมอัตราการสวิตช์หรือค่าเกณฑ์การขยาย Duty cycle ของมอสเฟต ให้เหมาะสมกับค่าภาระทางไฟฟ้า ซึ่งจะแสดงค่าของความเป็นสมาชิกที่มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

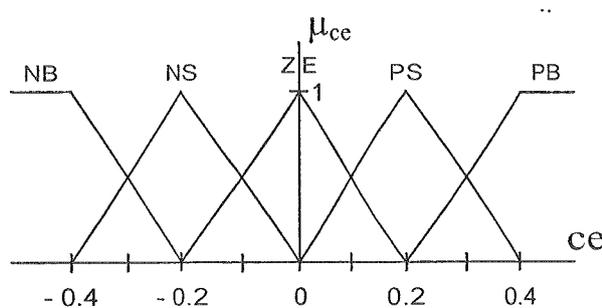
ในระบบการควบคุมฟัซซีลอจิกมีส่วนประกอบหลักของระบบด้วยกันอยู่ 4 ส่วน คือ

1. การแปลงค่าที่ใช้งานจริงให้เป็นค่าฟัซซี (Fuzzification) เป็นขบวนการที่แปลงค่าอินพุต ในส่วนของค่าความผิดพลาด (Error) และค่าการเปลี่ยนแปลงความผิดพลาด (Change of Error) โดยจะผ่านขั้นตอนการปรับตัวคูณของค่าอินพุตแรงดันให้มีความเหมาะสม เรียกว่า การปรับขนาดของอินพุต (Input scaling) จากนั้นจึงนำไปแปลงค่าให้อยู่ในรูปของฟัซซี

เนื่องจากเป็นข้อมูลที่มีความต่อเนื่องกัน การกระจายของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก จึงเลือกใช้การกระจายแบบสามเหลี่ยม (Triangle membership function) ฟังก์ชันที่ใช้ในการกำหนดระดับของค่าความเป็นสมาชิกฟัซซีได้ 5 ระดับ คือ NB (Negative Big), NS (Negative Small), ZE (Zero), PS (Positive Big), PB (Positive Small) ซึ่งกำหนดฟังก์ชันให้มีการทับกันระหว่างฟังก์ชัน ช่วงของความกว้างของค่าสมาชิกทั้งซ้ายและขวา จากโดเมน -1 ถึง 1 และมีค่าความสูงของฟัซซี (Membership grade) อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 จะได้รูปร่างการกระจายฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสามเหลี่ยมของอินพุตและเอาต์พุตตามภาพประกอบที่ 3.16 ก. และ ข.



ก. ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าความผิดพลาด(e)



ข. ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของค่าการเปลี่ยนแปลงความผิดพลาด(ce)

ภาพประกอบที่ 3.16 การกระจายของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

2.กฎการอนุมาน (Inference Engine) เป็นการอนุมานโดยอาศัยการแยกกฎ (Individual-rule based inference) พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาดและการเปลี่ยนแปลงความผิดพลาดที่ได้ทำการแปลงเป็นค่าฟัซซีแล้ว นำมาเปรียบเทียบกับค่าทั้งสองว่าตรงกับกฎ ซึ่งมีทั้งหมด 25 กฎ จากกฎจะสามารถอธิบายได้ในรูปของเงื่อนไข ถ้า.....แล้ว ได้ดังนี้

if e is <fuzzy set> and ce is <fuzzy set> then du is <fuzzy set>

เมื่อได้เอาต์พุตของระบบควบคุมแล้ว จึงนำค่านั้น ไปทำการแปลงจากค่าฟัซซีให้เป็นค่าที่ใช้ งานจริง (Defuzzification)

3.การแปลงค่าฟัซซีให้เป็นค่าที่ใช้งานจริง (Defuzzification) เนื่องระบบต้องการค่าจริงในการ ควบคุม ดังนั้นจึงต้องทำการแปลงจากค่าฟัซซีให้เป็นค่าที่ใช้งานจริง เพื่อนำไปใช้ควบคุมในระบบได้ ในการควบคุมระบบของงานวิจัยนี้เลือกใช้ วิธีการแปลงค่าฟัซซีเป็นค่าจริงด้วยความสูง (Height defuzzification) ซึ่งการเลือกใช้กฎมีอยู่ m กฎ จะสามารถหาค่าของเอาต์พุต u ได้จากสมการ (3.33)

$$u = \frac{\sum_{j=1}^n c_j f_j}{\sum_{j=1}^n f_j} \quad (3.33)$$

เมื่อ c_j คือค่าสูงสุดของการกระจายของเอาต์พุต ซึ่งตรงกับกฎที่ i
 f_i คือความสูงของกฎที่ i

4.ฐานความรู้ (Knowledge Base) เป็นข้อมูลค่าพารามิเตอร์ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกฟัซซีเซต ค่าตัวคุณสเกลและจำนวนกฎต่างๆ โดยกฎของฟัซซีเป็นเป็นวิธีการกระทำหรือการจัดการเงื่อนไขของ ตัวแปรอินพุต ซึ่งถูกออกแบบและสร้างขึ้น โดยอาศัยฐานความรู้ พฤติกรรมการทำงานของระบบแล้วจึง นำมาปรับเปลี่ยนค่าฐานความรู้ให้เหมาะสมในการควบคุม จากภาพประกอบที่ 3.16 ก. ภาพประกอบที่ 3.16 ข. ภาพประกอบที่ 2.16 และภาพประกอบที่ 2.22 นำมาเป็นแนวทางในการออกแบบกฎฟัซซี ของ การควบคุม ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตของการออกแบบกฎฟัซซี

Error (e)	Change of Error (ce)				
	PB	PS	ZE	NS	NB
PB	PB	PS	PS	PS	NB
PS	PS	PS	PS	NS	NS
ZE	PS	ZE	ZE	ZE	NS
NS	NS	NS	NS	NS	NS
NB	NB	NS	NS	NS	NB